DOI：10.11766/trxb201603240644

侵蚀性花岗岩坡地不同地貌部位土壤剖面风化特征研究*

陈儒章 张丽萍† 邬燕虹 邱陆旸

（浙江大学环境与资源学院，水资源与环境研究所，浙江省亚热带土壤与植物营养重点研究实验室，杭州 310058）

摘 要 为揭示发育于侵蚀性风化花岗岩坡地上不同地貌部位土壤剖面的风化发育特征，在浙江省选择了典型的风化花岗岩坡地：浙江省嵊州市水土保持监测站为研究区，在监测站同一坡面不同侵蚀强度的坡顶、坡中、坡底选取3个典型的土壤剖面（140 cm），从下至上等距离（20 cm）采集土壤样品，共采集21个土样。进行了各层土壤基本理化特性和化学全量的分析，并分别计算了3个剖面不同层次的主要化学风化系数及总的风化强度，结果表明：（1）在强烈侵蚀的花岗岩风化残积坡地发育的土壤，总体发育成熟过程较弱，其进一步的发育与典型的地带性土壤的发育有很大的差异，侵蚀过程严重地影响了土壤的进一步成熟，侵蚀强度越大，则土壤发育越差。（2）土壤剖面总的风化强度不大，上下层的递变差异很小，脱硅富铝化过程随着剖面深度的增加风化程度越来越弱。（3）土壤剖面的化学分层不明显，各种风化指标均在60 cm左右形成了一个分界层，其上受水力侵蚀影响明显，其下呈现出的特性以继承残积母质为主。（4）不同地貌部位的风化发育程度排序为：坡底 < 坡中 < 坡顶，其与采样坡面的侵蚀强度排序正好相反。（5）风化程度与有机质和黏粒含量具有较为明显的正比关系，在侵蚀环境下，土壤的物理特性对风化的影响明显，在沉积环境下土壤有机质的影响大于黏粒含量的影响。总之，由于受侵蚀的影响，坡地土壤剖面的淀积层不发育，剖面呈现出的假淀积层不是由淋溶作用形成的，而是具有一定风化程度的风化残积层，结果导致发育于山地丘陵侵蚀性坡地的土壤层次划分不同于常规的土壤层次划分。

关键词 侵蚀性坡地；土壤剖面；元素迁移；风化强度；发育特征

中图分类号 $S151^{+}.1$ **文献标识码** A

土壤侵蚀是一个严重的环境问题，在侵蚀环境下地表圈层中的生物、水和土壤圈的形成、发育和演化均明显区别于非侵蚀环境。然而，土壤圈层是生物、水和岩石圈的承接圈层，土壤圈层的形成、发育和演化特征能综合体现侵蚀对地表各环境要素的影响特征。基于此思考，本研究重点探讨侵蚀环境对土壤演化的影响。

由于风化花岗岩残积土母质具有其特殊的物理化学特性，因此发育于风化花岗岩母质上的土壤尤具代表性，受到诸多研究者的关注。关于花岗岩风化特征的研究，最早主要是围绕工程地质方面展开，重点探讨的是风化微结构特征、物化性质、崩解特性等内容[1-7]；地貌专家，从风化花岗岩地貌的演化和风化特征方面进行了时空特征的研究，总结出了不同环境条件下的花岗岩风化特征与地貌形态的关系[8-9]；地质学者主要是通过风化岩石矿物元素的变化，来分析其演化历史[10-12]；土壤学研究领域的专家，着重讨论岩石风化与土壤形成的关系[13-16]，也有学者研究了热带地区土壤剖面风化成土过程中的地球化学元素特征[17-18]。但就侵蚀环境下，采用化学元素迁移淋溶特征及风化强度综合研究土壤剖面层次发育特殊性的研究鲜有报道，

* 国家自然科学基金项目（41471221）资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China（No. 41471221）

† 通讯作者 Corresponding author：张丽萍（1959—），女，教授，博士生导师，主要从事土壤侵蚀与水土保持、水污染与水环境以及环境地学方面的研究工作。E-mail：lpzhang@zju.edu.cn

作者简介：陈儒章（1989—），男，陕西榆林人，硕士研究生，主要研究方向：土壤侵蚀与水土保持、农业面源污染。E-mail：1095924527@qq.com

收稿日期：2016-03-24；收到修改稿日期：2016-07-05；优先数字出版日期（www.cnki.net）：2016-07-22

仅见于少量关于土壤侵蚀与发育母质剥蚀关系方面的研究报道[19]。鉴于此，本研究在总结前人研究的基础上，采用化学全量分析的方法研究发育于侵蚀环境下风化花岗岩坡地不同地貌部位土壤剖面化学元素的分布、富集及其迁移规律，进而探索发育于侵蚀性风化花岗岩坡地上土壤剖面发育的层次特点，以实现常规测试方法对新问题的分析。本研究在浙江省选择了典型的侵蚀性风化花岗岩坡地：浙江省嵊州市上东水库水土保持监测站为研究区，拟通过不同地貌部位土壤剖面不同深度层次的系列采样，样品的化学全量及土壤基本理化性质的测试，系列风化指标的计算，综合风化强度的对比分析，进而揭示出发育于侵蚀性风化花岗岩坡地上不同地貌部位土壤剖面的风化特征，使其研究成果能为发育于山地丘陵区侵蚀性坡地土壤的层次划分提供科学依据。

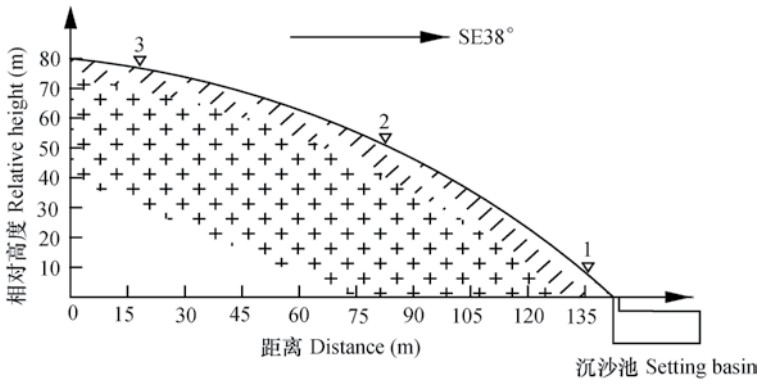
1　材料与方法

1.1　研究区概况

嵊州市上东水库水土保持监测站，位于浙江省中部偏东，曹娥江上游。多年平均气温为16.4℃，1月多年平均气温为4.2℃，7月多年平均气温为28.6℃。多年平均降水量为1 446mm，日照为1 988 h，无霜期235 d。地貌类型为浙东低山丘陵及台地。土壤发育母质为风化花岗岩残积层，所属的地带性土壤为红壤。土壤侵蚀以水力侵蚀为主，整个坡面均以雨滴击溅侵蚀和片蚀为主，侵蚀强度较大。在土壤侵蚀作用下，导致地表物质组成粗化严重，保水保土性能降低，强烈影响了土壤剖面化学元素的迁移，使得土壤发育层次不同于地带性土壤，母质属性遗传明显。目前的土地利用类型为园地，坡度22°，植被覆盖度 < 45%。

1.2　样品采集

为了揭示不同地貌部位土壤剖面不同层位的风化特征，以及侵蚀强度对土壤剖面各层化学元素迁移的影响。本研究在所选研究区：浙江省嵊州市上东水库水土保持监测站，根据实地勘查，选择典型的侵蚀性地形坡面，在所选的同一坡面的坡顶、坡中、坡底分别选取3个剖面（均属于侵蚀型剖面，土体中无堆积现象），经过综合对比，在每个地貌位置各选择1个最底层土壤风化程度目视相一致的剖面，作为样品采集的剖面，深度约为140 cm（图1）。根据土壤学剖面样品从下至上采集规范，从剖面最下层开始每隔20 cm等距离取样，在每个剖面的相应层位各采集1个混合土样（每个混合土样为同一层位平行位移后的三个重复，混合装于同一样品袋中），3个剖面共采集21个混合土样，装入新鲜的样品袋中带回实验室风干后处理分析。



注：图中1，2，3代表坡底，坡中，坡顶采样剖面

Note：1，2 & 3 stands for the sampling profile in the bottom，the middle and the top of the slope respectively in the figure

图1　样品采集剖面分布示意图

Fig. 1　Distribution of soil profiles for soil sampling in the studied slope

1.3　化学元素分析

衡量发育于风化花岗岩母质的土壤风化发育程度，其实质是检测碱金属，碱土金属的水化作用与水解作用，脱硅富铝化作用。因此，土壤剖面不同深度的风化特征主要体现在SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3、CaO、MgO、K_2O、Na_2O等7个氧化物的化学含量变

化，以及这些元素的重新组合。本研究在测试前将每个样品充分混匀，21个点的样品均过200目筛备用，委托南京大学现代分析中心，采用X射线荧光光谱仪对21个样品进行化学全量分析，选择以上7个主要氧化物的化学含量作为计算相关风化指标的依据。

1.4 不同地貌部位土壤剖面风化系数

风化指标的选取是进行土壤剖面风化发育程度定量评价的基础[20]，由于所选研究区的地带性土壤为红壤，铁铝的富集与易溶性盐类的淋失是主要的化学风化过程。所以，本研究中选取的化学风化指标主要以体现铁铝富集和盐基淋失的指标为主，分别有：①铝硅比率Al_2O_3/SiO_2，②铁硅系数Fe_2O_3/SiO_2，③铝铁硅系数R_2O_3/SiO_2，④风化淋溶系数$Al_2O_3/(RO+R_2O)$，⑤残积系数$R_2O_3/(RO+R_2O)$等5个指标，前三个化学风化指标可以反映出铝铁的富集和脱硅的程度，后两个化学风化指标则可以反映出盐基的淋失程度。在各风化指标计算过程中，为了风化强度的计算和分析，各指标以富集元素为分子进行分子量计算，这样所计算的风化强度值越大，则说明风化强度越大[8]。不同地貌部位不同深度的土壤风化指标计算结果见表1。

1.5 风化强度计算

单一风化指标只能反映指标所计算元素不同层次间的变化特征，在综合评价中不同地貌部位土壤剖面不同层次的风化程度就难以比较，这些指标在不同剖面和不同土层会出现不同的规律，因此用单一风化指标进行分析，有时会出现误判或顾此失彼。由此，本研究在计算对比不同地貌部位土壤剖面化学风化特征时引入了综合反映风化强度的计算公式：

$$I_t = \frac{E_r \times \overline{C} + E_m}{2} \times 100\% \quad (1)$$

式中，I_t为风化强度，E_r为风化率均衡度，E_m为元素迁移率均衡度，$\overline{C}$为平均淋溶系数，其求取方式分别为：

$$E_r = \frac{e^{H(s)}}{N} \quad (2)$$

$$E_m = \frac{E^{H(s)}}{N} \quad (3)$$

式中，$H(s)$为信息熵函数

$$H(s) = -\ln P_i \cdot \sum P_i \quad (4)$$

N为样品个数，P_i为每个样品占样品总数的百分比。

$$\overline{C} = \frac{Y_0 - Y_i \times \frac{Y_A}{Y_a}}{Y_0} \quad (5)$$

式中，$\overline{C}$为平均淋溶系数，Y_0为最底层该氧化物的重量百分比，Y_i为以上各层氧化物的百分比，Y_A为最底层Al_2O_3含量，Y_a为以上各层Al_2O_3含量。（当$\overline{C}$值≤0时不参与计算）。

根据上式计算，不同地貌部位不同层次土壤风化强度计算结果见表1。为了分析同一剖面不同层次相对于最下层的风化强度，便于不同剖面各层风化强度的对比，在表1计算数据的基础上，进一步计算了不同层次相对于最下层的相对风化指标值（W_R），计算结果见表2。

$$W_R = \frac{W_i}{W_0} \quad (6)$$

式中，W_0为剖面最下层各风化指标，W_i为剖面各层相应的风化指标。

2 结 果

2.1 不同地貌部位土壤剖面脱硅富铝铁化特征

由表1和表2数据显示：（1）铝硅比值（Al_2O_3/SiO_2）在坡顶、坡中、坡底3个土壤剖面从下至上呈现出增加的趋势，坡顶的递增速率最大，上层能达到最下层的2倍。坡中的递增速率较慢，而且最大值出现在40～60 cm土层，向上层又开始下降。铝硅比值Al_2O_3/SiO_2在坡底总体较小，除120～140 cm土层一个0.20的异常值点外，增加的速度也很小。说明脱硅富铝化过程在坡顶与坡中2个土壤剖面规律性比较明显，坡底的规律性不明显。从相对风化指标来看，坡顶与坡中Al_2O_3的富集程度呈现出从剖面底部向上递增的规律，最大值均出现在0～40 cm土层，而坡底土壤剖面却是从底部向上递减，但是在40～60 cm土层出现了一个异常值。（2）铁硅比率（Fe_2O_3/SiO_2）在坡顶、坡中、坡底3个土壤剖面总体显示比值较小，在0.02上下波动。铁硅系数在坡顶规律比较明显，而且最大值出现在20～40 cm土层，在坡中和坡底基本没有变化。与铝的富集程度相比，小了一个数量级，

表1　坡地不同地貌部位土壤剖面各层的风化系数及风化强度

Table 1　Weathering coefficient and intensity of each soil layer of the soil profiles at different sections of the slope

地点 Location	深度 Depth (cm)	$\frac{Al_2O_3}{SiO_2}$	$\frac{Fe_2O_3}{SiO_2}$	$\frac{R_2O_3}{SiO_2}$	$\frac{Al_2O_3}{RO+R_2O}$	$\frac{R_2O_3}{RO+R_2O}$	有机质 Organic matter ($g\ kg^{-1}$)	黏粒 Clay (%)	风化强度 Weathering intensity
坡顶 The top of the slope	0 ~ 20	0.22	0.02	0.24	1.45	1.71	47.46	6.22	0.56
	20 ~ 40	0.22	0.03	0.24	1.72	2.04	16.51	11.76	0.56
	40 ~ 60	0.19	0.02	0.21	1.89	2.24	15.82	11.13	0.57
	60 ~ 80	0.18	0.02	0.20	1.75	2.05	16.17	11.78	0.56
	80 ~ 100	0.17	0.02	0.19	1.61	1.90	17.20	9.76	0.55
	100 ~ 120	0.17	0.02	0.19	1.67	1.94	14.45	5.04	0.56
	120 ~ 140	0.11	0.01	0.12	1.37	1.66	14.72	5.19	0.50
坡中 The middle of the slope	0 ~ 20	0.20	0.02	0.23	1.35	1.51	28.20	4.86	0.54
	20 ~ 40	0.20	0.02	0.23	1.43	1.60	28.89	6.41	0.55
	40 ~ 60	0.29	0.02	0.21	1.61	1.80	18.92	11.35	0.54
	60 ~ 80	0.16	0.02	0.18	1.67	1.86	15.82	13.63	0.53
	80 ~ 100	0.15	0.02	0.16	1.72	1.94	15.82	16.55	0.52
	100 ~ 120	0.14	0.02	0.16	1.69	1.92	17.20	15.32	0.51
	120 ~ 140	0.14	0.02	0.16	1.64	1.85	17.88	11.22	0.50
坡底 The bottom of the slope	0 ~ 20	0.17	0.02	0.19	1.30	1.44	45.40	6.16	0.50
	20 ~ 40	0.17	0.02	0.19	1.59	1.78	22.01	16.92	0.51
	40 ~ 60	0.15	0.02	0.17	1.64	1.82	17.20	12.24	0.52
	60 ~ 80	0.15	0.02	0.17	1.72	1.94	13.07	10.18	0.53
	80 ~ 100	0.14	0.02	0.16	1.61	1.83	15.13	8.76	0.53
	100 ~ 120	0.13	0.02	0.14	1.52	1.73	15.82	16.16	0.51
	120 ~ 140	0.20	0.02	0.22	1.59	1.77	15.13	14.21	0.50

说明铁的富集强度弱于铝的富集强度。（3）铁铝硅系数（R_2O_3/SiO_2）在坡顶、坡中、坡底3个土壤剖面中，从下层至上层均呈现出递增的趋势，增加的趋势尤以坡顶土壤剖面最为明显，上层的铁铝硅比值能达到最下层的两倍。坡中土壤剖面的富铁过程弱于坡顶，以60 cm为界限，上下差异比较明显，最上层的铁铝硅系数约为最下层的1.4倍。在坡底土壤剖面铁铝硅系数总体比值较小，而且在120 ~ 140 cm土层出现了一个0.22的高突变值，因而使得相对于最下层的相对风化率出现了小于1的值（表2），如果去掉这一异常值，其富集程度可分布在1.20 ~ 1.40之间。

2.2　不同地貌部位土壤剖面盐基淋溶特征

基于表1和表2计算结果可知：（1）盐基总淋溶强度的变化规律。根据地带性红壤的剖面发育特征，Al_2O_3相对比较稳定，而盐基离子易受淋洗，因此，$Al_2O_3/(RO+R_2O)$的比值越大，说明淋溶作用越强。而在本研究中，在坡顶从土壤剖面底部向上至20 cm深度处，基本上呈现增加的趋势，说明有一定的淋溶作用。但在0 ~ 20 cm土层出现了一个1.45的减小值，说明土壤表层的盐基离子稍有增加的现象，但也大于最下层的1.37。在坡地中部的土壤剖面中，以40 cm为界，以上出现减小的趋势，以下变化规律不明显，围绕在1.6 ~ 1.7之间变化，说明盐基离子淋溶作用不明显，上层还有累积现象。坡底土壤剖面中，盐基总淋溶过程基本上变化不大，围绕1.5 ~ 1.7之间波动，没有一定的规律，但表层的累积现象也明显。在同一坡面不同地

表2 坡地不同地貌部位土壤剖面各层风化系数及风化强度相对值

Table 2 Relative weathering coefficient and intensity of each soil layer of the soil profiles at different sections of the slope

地点 Location	样号 Sample no.	深度 Depth (cm)	$\frac{Al_2O_3}{SiO_2}$	$\frac{Fe_2O_3}{SiO_2}$	$\frac{R_2O_3}{SiO_2}$	$\frac{Al_2O_3}{RO+R_2O}$	$\frac{R_2O_3}{RO+R_2O}$	$I_{相对}$ [1)] $I_{relative}$
坡顶 The top of the slope	1	0 ~ 20	2.00	2.00	2.00	1.01	1.03	1.12
	2	20 ~ 40	2.00	3.00	2.00	1.26	1.23	1.12
	3	40 ~ 60	1.73	2.00	1.75	1.38	1.35	1.14
	4	60 ~ 80	1.64	2.00	1.67	1.28	1.23	1.10
	5	80 ~ 100	1.55	2.00	1.58	1.18	1.14	1.10
	6	100 ~ 120	1.55	2.00	1.58	1.22	1.17	1.12
	7	120 ~ 140	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
坡中 The middle of the slope	8	0 ~ 20	1.43	1.00	1.44	0.82	0.82	1.08
	9	20 ~ 40	1.43	1.00	1.44	0.87	0.86	1.10
	10	40 ~ 60	1.36	1.00	1.31	0.98	0.97	1.08
	11	60 ~ 80	1.14	1.00	1.13	1.02	1.01	1.06
	12	80 ~ 100	1.07	1.00	1.00	1.05	1.05	1.02
	13	100 ~ 120	1.00	1.00	1.00	1.03	1.04	1.02
	14	120 ~ 140	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
坡底 The bottom of the slope	15	0 ~ 20	0.85	1.00	0.86	0.82	0.81	1.00
	16	20 ~ 40	0.85	1.00	0.86	1.00	1.01	1.02
	17	40 ~ 60	1.75	1.00	0.77	1.03	1.03	1.04
	18	60 ~ 80	0.75	1.00	0.77	1.08	1.10	1.06
	19	80 ~ 100	0.70	1.00	0.73	1.01	1.03	1.06
	20	100 ~ 120	0.65	1.00	0.64	0.96	1.98	1.02
	21	120 ~ 140	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

注：1）表示不同层次相对于最底层的相对风化强度，计算公式与式（1）相同 Note：1）stands for weathering intensity of each soil layer relative to the bottom layer and its equation for calculation is the same as (1)

貌部位的3个土壤剖面中，有一个共同的特点，就是表层盐基未淋溶，反而有累积的现象，不同于地带性红壤演化的趋势和理论上的演化规律。

（2）残积系数的变化规律。由于残积系数的计算要素，是分子增加了一个Fe_2O_3，但在本研究区铁的富集强度并不突出，所以，残积系数$R_2O_3/(RO+R_2O)$与盐基总淋溶系数$Al_2O_3/(RO+R_2O)$有相似的规律。在坡顶以60 cm为界，从剖面底层至60cm间呈现出递增的趋势，而从60 cm以上则逐渐减少。在坡地中部土壤剖面中，从底部至60 cm深度处，围绕在1.8 ~ 1.9附近波动，变化不明显，在60 cm以上明显减少。坡底土壤剖面中，残积系数的变化规律类似于坡中的土壤剖面，但整个剖面各层的比值均较小。在这3个土壤剖面中，残积系数在60 cm深度均呈现出一个值的突变，形成了一个分界线，向上残积系数趋于减小。

2.3 不同地貌部位土壤剖面风化强度特征

风化强度是多个风化指标信息的综合，能体现土壤剖面的综合风化特征（图2）。由不同地貌部位3个土壤剖面的平均风化强度来看，总体风化强度均不大，但以坡顶最大（0.55），坡中居中（0.53），坡底最小（0.51）。就土壤剖面中各层的变化规律来看，坡顶土壤的整个剖面围绕0.56上下波动，最大值出现在40 ~ 60 cm土层，最大值与最小值相差0.07。在坡地中部的土壤剖面中，规律性比较明显，从剖面底层至20 cm深度处，呈现出递增的规律，但递增的幅度很小，整个剖面最大值与最小值的差只有0.05。坡底土壤剖面风化强度基

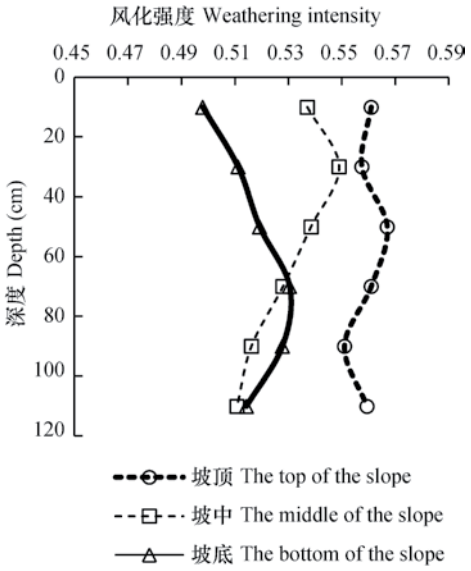


图2　坡地不同地貌部位土壤剖面风化强度变化趋势

Fig. 2　Variation of weathering intensity of the soil profile relative to position on the slope

本变化不大，围绕0.50 ~ 0.53之间波动，最大值出现在60 ~ 100 cm土层，最大值与最小值相差0.03。

3　讨　论

由表1、表2和图2可以看出，一方面，风化强度的高值均出现在土壤剖面表层，而不是出现在耕作层，各种风化指标均在60 ~ 80 cm之间形成一个分界层；另一方面，风化强度在坡地中部土壤剖面小于坡顶的土壤剖面，在坡底土壤剖面反而最低。其主要原因：第一，由于在坡地的底部和中部，坡度较陡，土壤侵蚀强度要大于坡顶（坡顶汇水面积小，水力侵蚀较小）。在侵蚀过程中，一些细的黏粒随坡面径流流失，所以铝和铁的富集值要小，计算出的风化强度值就小。第二，在土壤剖面上层（0 ~ 40 cm）是水力侵蚀的主要层次，主要的化学风化物易被侵蚀而流失掉，其中尤其以盐基离子的活性最强，使得盐基淋溶系数和残积系数的计算值随剖面深度的增加有变大的趋势，进而影响了风化强度的计算值。第三，本次研究发现坡底由于处于沉沙池的上端，坡面径流在此处容易汇集，使得坡底汇流面积最大，结果导致了其侵蚀的强度最大，从而风化程度最低。在3个土壤剖面中，在60cm附近形成了一个分界层，下层具有继承残积母质风化的规律，上层则突出显示受侵蚀影响较为明显。

从土壤剖面演化过程中元素迁移的角度来讨论。铝硅系数Al_2O_3/SiO_2，铁硅系数Fe_2O_3/SiO_2，铝铁硅系数R_2O_3/SiO_2在三个剖面由上至下变小的趋势均较为明显，这就很好地反映出随着剖面深度的增加风化程度越来越弱。主要是因为SiO_2易随水流失，而Al_2O_3，Fe_2O_3较稳定，不易被雨水冲刷。这一脱硅富铝化的过程是对花岗岩风化残积母质的明显继承，但其剖面总的风化强度不大，上下层的递变差异很小。从理论上来讲，碱金属与碱土金属元素由于活动性较强，应该呈现出的是在土壤剖面从上至下增加的规律。但由于研究区目前的土地利用为园地，有定时施肥的习惯，使得在三个土壤剖面表层0 ~ 20cm处均出现了碱金属与碱土金属元素微累积的现象，但是在20cm以下碱金属与碱土金属元素受到淋溶作用较为明显，与地带性土壤和理论规律相符合。从而可以推得人为的施肥影响深度约为20 ~ 40 cm。

从地学的角度来分析。发育于花岗岩风化母质的土壤剖面随深度的增加风化强度变小，全风化层的风化强度最高。但是该研究区土壤的风化特征明显区别于岩石的风化特征，其后期演化与土壤侵蚀有密切的关系。由表1可知风化强度与有机质和黏粒含量具有较为明显的正比关系，在坡地的中部土壤剖面中，风化强度与土壤黏粒含量的相关性达到了0.69，与有机质含量的相关性为0.72；而在坡底则与有机质含量的相关性较高，与黏粒含量的相关性较差；在坡顶则与黏粒含量的相关性较好，与有机质含量的相关性较差。由此可知，在侵蚀环境下，土壤的物理特性对风化的影响较为明显，其中土壤黏粒含量在一定程度上能反映出土壤的风化程度。黏粒矿物属于次生矿物，含有大量的矿质元素，这就使得黏粒含量高的土层风化程度高于黏粒含量低的土层，黏粒含量越高，则风化程度越深，土壤元素释放的就更彻底。

4　结　论

在强烈侵蚀的风化花岗岩坡地发育的土壤，总体发育较弱，其进一步的发育与典型地带性土壤的发育有很大的差异。侵蚀过程严重地影响了土壤的进一步发育以及层次的划分，侵蚀强度越大，则土壤发育越差，最大风化强度即为水力侵蚀的最大影

响深度，并不是在土壤表层，而是在表层以下的一定深度，同时土壤剖面的层次划分与地带性土壤的层次划分差别很大。土壤表层的粗颗粒是物理风化的结果，一些化学风化的黏土矿物和细颗粒则被雨水和坡面径流冲刷而流失掉，土壤剖面的淀积层不发育，剖面呈现出的假淀积层不是由淋溶作用形成的，而是具有一定风化程度的风化残积层，发育于山地丘陵侵蚀性坡地的土壤层次划分不同于常规的土壤层次划分。

参 考 文 献

[1] 吴能森. 花岗岩残积土的分类研究. 岩土力学，2006，27（12）：2299—2304
Wu N S. The research of granite residual soil classification（In Chinese）. Rock and Soil Mechanics，2006，27（12）：2299—2304

[2] 宋全杰，李海波，李俊如，等. 强风化花岗岩动力学参数的试验研究. 岩土力学，2013，34（4）：1031—1036
Song Q J，Li H B，Li J R，et al. The experimental study of strong weathering granite kinetics parameters（In Chinese）. Rock and Soil Mechanics，2013，34（4）：1031—1036

[3] 尚彦军，王思敬，岳中琦，等. 全风化花岗岩孔径分布-颗粒组成-矿物成分变化特征及指标相关性分析. 岩土力学，2004，25（10）：1545—1550
Shang Y J，Wang S J，Yue Z Q，et al. The correlation analysis of change features and indicators of pore distribution，particle composition and mineral component indicators of completely weathered granite（In Chinese）. Rock and Soil Mechanics，2004，25（10）：1545—1550

[4] 张抒，唐辉明. 非饱和花岗岩残积土崩解机制试验研究. 岩土力学，2013，34（6）：1668—1674
Zhang S，Tang H M. The experimental research of disintegration mechanism of unsaturated granite residual soil（In Chinese）. Rock and Soil Mechanics，2013，34（6）：1668—1674

[5] 周小文，刘攀，胡黎明，等. 结构性花岗岩残积土的剪切屈服特性试验研究. 岩土力学，2015，36（S2）：157—163
Zhou X W，Liu P，Hu L M，et al. The experimental research of shear and yield properties of structural granite residual soil（In Chinese）. Rock and Soil Mechanics，2015，36（S2）：157—163

[6] 陈晓平，周秋娟，蔡晓英. 高液限花岗岩残积土的物理特性和剪切特性. 岩土工程学报，2011，33（6）：901—908
Chen X P，Zhou Q J，Cai X Y. Physical property and shear property of high liquid limit granite residual soil（In Chinese）. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2011，33（6）：901—908

[7] 赵建军，王思敬，尚彦军，等. 全风化花岗岩抗剪强度影响因素分析. 岩土力学，2005，26（4）：624—628
Zhao J J，Wang S J，Shang Y J，et al. The effect factors analysis of completely weathered granite shear strength（In Chinese）. Rock and Soil Mechanics，2005，26（4）：624—628

[8] 张丽萍，朱大奎，杨达源. 长江三峡坝区花岗岩风化壳化学元素迁移特征. 地理学报，2001，56（5）：514—521
Zhang L P，Zhu D K，Yang D Y. Chemical element transferring features of weathering granite regolith in Three Gorges Dam Region（In Chinese）. Acta Geographica Sinica，2001，56（5）：514—521

[9] 齐岩辛，万治义，陈美君，等. 浙江大明山花岗岩地貌景观特征与演化. 科技通报，2016，32（2）：66—70
Qi Y X，Wan Z Y，Chen M J，et al. Granite landscape characteristics and evolution in Zhejiang Daming Mountain（In Chinese）. Bulletin of Science and Technology，2016，32（2）：66—70

[10] 杨骏雄，刘丛强，赵志琦，等. 不同气候带花岗岩风化过程中稀土元素的地球化学行为. 矿物学报，2016，36（1）：125—137
Yang J X，Liu C Q，Zhao Z Q，et al. The geochemical behavior of rare earth elements of granite weathering process in different climatic zone（ In Chinese）. Acta Mineralogica Sinica，2016，36（1）：125—137

[11] 李建武，张甘霖，李德成，等. 强烈风化条件下玄武岩发育土壤的元素地球化学特征. 地球与环境，2012，40（4）：491—498
Li J W，Zhang G L，Li D C，et al. Basalt development soil elements geochemistry characteristics under strong weathering conditions（ In Chinese）. Earth and Environment，2012，40（4）：491—498

[12] 陈文，万渝生，李华芹，等. 同位素地质年龄测定技术及应用. 地质学报，2011，85（11）：1917—1947
Chen W，Wan Y S，Li H Q，et al. Isotope geological age determination technique and application（ In Chinese）. Acta Geologica Sinica，2011，85（11）：1917—1947

[13] Guicharnaud R，Paton G I. An evaluation of acid deposition on cation leaching and weathering rates of an Andosol and a Cambisol.Journal of Geochemical Exploration，2006，88（1/3）：279—283

[14] Riebe C S，Kirchner J W，Finkel R C. Long-term

rates of chemical weathering and physical erosion from cosmogenic nuclides and geochemical mass balance. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2003, 67(22): 4411—4427

[15] 黄成敏，龚子同. 海南岛北部玄武岩上土壤发生研究Ⅲ.元素地球化学特征. 土壤学报，2002，39(5)：643—652
Huang C M, Gong Z T. Study on genesis of soils derived from basalt in northern hainan island Ⅲ. Element geochemistry (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(5): 643—652

[16] 张瑾，李德成，张甘霖，等. 热带地区玄武岩发育时间序列土壤中石英颗粒微形态特征. 土壤，2012，44(1)：111—117
Zhang J, Li D C, Zhang G L, et al. Quartz particles micro-morphological features in the soil of basalt development time series in the tropics (In Chinese). Soils, 2012, 44(1): 111—117

[17] 何跃，张甘霖. 热带地区玄武岩发育土壤中的生物硅及其发生学意义. 土壤学报，2010，47(3)：385—392
He Y, Zhang G L. Biological silicon and genetics significance in the soil of basalt development in the tropics (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(3): 385—392

[18] 杨金玲，张甘霖，黄来明. 典型亚热带花岗岩地区森林流域岩石风化和土壤形成速率研究. 土壤学报，2013，50(2)：253—259
Yang J L, Zhang G L, Huang L M. The research of rock weathering and in soil formation rate typical subtropical granite region forest basin (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(2): 253—259

[19] 张丽萍，杨达源，朱大奎. 母岩的风化剥蚀速率与土壤允许流失量的关系—以长江三峡坝区风化花岗岩土壤为例. 长江流域资源与环境，2003(4)：382—387
Zhang L P, Yang D Y, Zhu D K. The relationship between weathering denudation rate of the mother rock and soil loss tolerance—weathering granite soil in Three Gorges Dam Region as an example (In Chinese). Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2003(4): 382—387

[20] 刘成禹，何满潮. 对岩石风化程度敏感的化学风化指数研究. 地球与环境，2011，39(3)：349—354
Liu C Y, He M C. The research of sensitive chemical weathering index for the degree of rock weathering (In Chinese). Earth and Environment, 2011, 39(3): 349—354

Soil Profile Weathering Feature of Eroded Weathering Granite Slope at Different Sections

CHEN Ruzhang　ZHANG Liping†　WU Yanhong　QIU Luyang

(*Institute of Soil and Water Resource and Environment*, *College of Environmental and Resource Sciences of Zhejiang University*, *Zhejiang provincial key laboratory of subtropical soil and plant nutrition*, *Hangzhou* 310058, *China*)

Abstract　【Objective】Strong soil erosion affects profoundly soil development on slopes. On slopes the same in parent material, but different in erosion intensity, soil varies sharply in weathering development degree. In the granite hill and mountain areas of Southeast China, the soil developed on weathering residual slopes suffers severe water erosion, and differs distinctly from other zonal soils in soil weathering development profile. 【Method】 This study in oriented to characterize weathering development of soil profiles at different landform positions of an eroded weathering granite slope. A typical weathering granite slope was selected in Shengzhou, Zhejiang province for monitoring of soil erosion with the help of the Shengzhou Soil and Water Conservation Monitoring Station. On the slope where the station sits, three typical soil profiles (140 cm in depth) were selected at sites different in erosion intensity along the slope from top to bottom, and soil samples were collected 20 cm apart from bottom to top in each soil profile. So a total of 21 soil samples were gathered for analysis of basic physicochemical properties and chemical total contents in various soil layers. On such a basis, calculation was done of main chemical weathering coefficients of the soil layers and total weathering intensity of the soil profiles, separately. As the zonal soil of the studied is red soil, of which the main chemical weathering processes are enrichment of iron and aluminum and leaching of dissolved salts.

Therefore, the chemical weathering indices selected in this study were dominantly those that may reflect enrichment of iron and aluminum and leaching of dissolved salts, they are ①Al_2O_3/SiO_2, ② Fe_2O_3/SiO_2, ③ R_2O_3/SiO_2, ④$Al_2O_3/(RO+R_2O)$ and ⑤$R_2O_3/(RO+R_2O)$. In order to analyze weathering intensity of each soil layer relative to the bottom layer in the same soil profile and facilitate comparison between the soil layers in weathering intensity, further calculation was performed of relative weathering intensity ($I_{relative}$) of each soil layer relative to the bottom one. 【Result】The following conclusions were drawn from the analysis and calculation: (1) The soil of the profile at the site of severely eroded weathering residual granite slope is on the whole rather slow in soil developing and maturing process, and differs sharply from the typical zonal soil in further development, and severe erosion greatly hinders maturing processes of the soil; and the severer the erosion, the poorer the soil developed; (2) The soil profile as a whole is not very high in weathering intensity; the variation in weathering intensity between soil layers in the soil profile is very gentle; the peak of weathering intensity appears in the 40~60cm soil layer, instead of the surface soil layer; the processes of desilication and aluminum enrichment weaken with profile depth and intensifying weathering degree; and the decreasing trends of Al_2O_3/SiO_2, Fe_2O_3/SiO_2 and R_2O_3/SiO_2 are quite obvious in all the three soil profiles, which demonstrate that soil weathering degree lowers with profile depth; (3) Chemical stratification of the soil profiles is not distinct, with all the weathering indices forming a boundary layer at about 60cm in depth; the layers above it are obviously affected by water erosion and those below mainly inherit the properties of the residual soil parent material; (4) In terms of weathering intensity, the three soil profiles display an order of bottom profile < mid profile < top profile, which is just the reverse of that in terms of erosion intensity; (5) Weathering degree is significantly and positively related to the contents of organic matter and clay, and also to physical properties of the soil under erosion; However, the influence of organic matter content is greater than that of clay content in the soil in deposition environment. 【Conclusion】Affected by erosion, the illuvial horizon of soil profile does not develop on slopes, the false illuvial horizon is a certain weathering degree weathering residual layer, but is not formed by eluviations, which leads to the division of soil layer developed from hill and mountain areas differs from conventional method.

Key words Eroded slope; Soil profile; Element migration; Weathering intensity; Development characteristics

(责任编辑：檀满枝)